

УДК 621.039.31

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗМІЩЕННЯ ДОЗУЮЧОЇ ТРУБКИ ПОРОШКОВОГО ЖИВИЛЬНИКА ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПИЛЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

**В.В. Кустов**

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024  
e-mail: [public@nunge.edu.ua](mailto:public@nunge.edu.ua)

*Досліджено рух частинок порошку в потоці розпилюючого газу. Обґрунтовано координати встановлення дозуючої трубки порошкового живильника пневматичної дії та оптимізовано технологічні параметри процесу нанесення композиційних покриттів електродуговою металізацією.*

Ключові слова: композиційне покриття, порошок, електродугове напилення, струмінь, розпилюючий газ, порошковий живильник, дозуюча трубка.

*Исследовано движение частиц порошка в потоке распыливающего газа. Обоснованы координаты установки дозирующей трубки порошкового питателя пневматического действия и оптимизированы технологические параметры процесса нанесения композиционных покрытий электродуговой металлизацией.*

Ключевые слова: композиционное покрытие, порошок, электродуговое напыление, поток, распыливающий газ, порошковый питатель, дозирующая трубка

*The summary: Motion of particles of powder is investigational in the stream of dispersive gas. The co-ordinate of establishment of batching tube of powder metering device is explained and the technological parameters of process of causing of composite coatings are optimized by electro-arc metallization.*

Keywords: composite coatings electro-arc coverage, stream, dispersive gas, metering device of powder, batching tube.

Для забезпечення заданих фізико-механічних властивостей поверхневих шарів деталей машин застосовують різноманітні технологічні методи. Серед них, на нашу думку, на особливу увагу заслуговує електродугова металізація (електродугове напилення). Даний метод дає змогу наносити на робочі поверхні деталей машин захисні покриття різного службового призначення (корозійно- та зносостійкі, термостійкі тощо) та вирізняється високою продуктивністю, простотою конструкції технологічного обладнання, а також можливістю його автоматизації. Такі особливості технології та обладнання для електродугової металізації роблять її доступною для ефективного використання у промисловості як при виготовленні нових, так і для відновлення зношених деталей машин. Практика свідчить, що сфери застосування електродугових захисних та відновних покриттів постійно розширюються. Цьому сприяють вказані переваги електродугового методу, а також впровадження у виробництво нових технічних рішень, які розширюють технологічні можливості та покращують властивості покриттів.

Такими технічними рішеннями є:

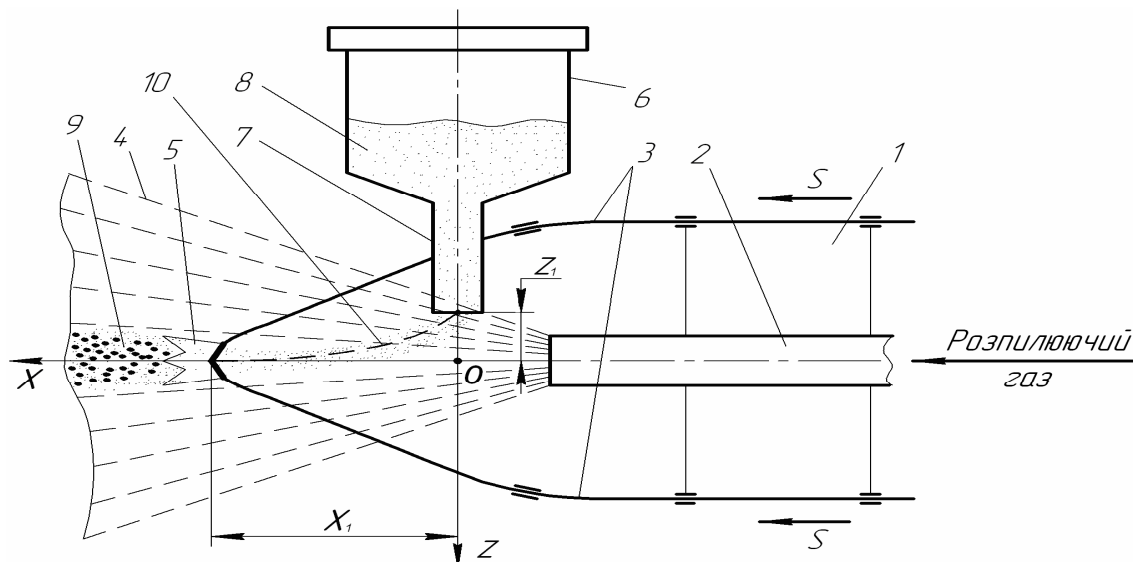
- 1 – використання порошкових дротів [1];
- 2 – спосіб активної дугової металізації [2];
- 3 – електродугова металізація в надзвуківому потоці продуктів згоряння метану [3];
- 4 – використання дротів-електродів та незалежної подачі порошку в зону горіння дугового розряду [4].

Перші три напрямки вдосконалення електродугової металізації є достатньо вивченими. Четвертому напрямку – (нанесенню композиційних покриттів з використанням дротів-

електродів та незалежної подачі порошку) присвячена відносно невелика кількість робіт, де відсутні дані, необхідні для практичного застосування цього методу, зокрема дані про координати введення частинок порошку в струмінь розпилюючого газу [5, 6], що стримує як проектування установок для реалізації цього методу напилення покриттів, так і розроблення нових технологічних процесів зміцнення деталей машин.

Метою даної роботи є теоретичне дослідження введення частинок порошку із живильника в струмінь розпилюючого повітря електродугового металізатора та визначення координат розміщення дозуючої трубки для забезпечення напилення композиційних покриттів. Для досягнення мети в роботі поставлена задача: теоретично обґрунтувати раціональні параметри технології та технологічного обладнання для напилення композиційних покриттів.

Об'єктом дослідження вибрано технологічний процес напилення композиційних покриттів електродуговою металізацією з використанням дротів і незалежної подачі порошкових матеріалів із живильника через дозуючу трубку. Нанесення покриттів при цьому методі реалізується за схемою, зображеною на рис. 1. На практиці електродуговий металізатор розміщують таким чином, щоб горизонтальна площина проходила через його дрти-електроди. Порошковий живильник пневматичного типу із дозуючою трубкою розміщується у вертикальній площині для того, щоб напрямком дії сил земного тяжіння співпадав із напрямком введення частинок порошку в струмінь розпилюючого газу. Для спрощення розрахункової схеми її



1 – електродуговий каталізатор; 2 – дуттєве сопло; 3 – дрони-електроди; 4 – струмінь розпилюючого повітря; 5 – зона горіння електричної дуги; 6 – порошковий живильник пневматичної дії; 7 – дозуюча трубка; 8 – частинки порошку; 9 – суміш розпилюючого газу, розплавленого металу дотів та частинок порошку; 10 – траєкторія руху частинок порошку

Рисунок 1 – Схема електродугового металізатора з порошковим живильником

елементи – електродуговий металізатор і порошковий живильник із дозуючою трубкою – умовно зображені на рисунку в одній (вертикальній) площині.

Формування композиційних покриттів згідно із запропонованою схемою здійснюється шляхом додаткового подавання частинок порошку через дозуючу трубку порошкового живильника в струмінь розпилюючого газу (повітря), де вони змішуються із частинками розплавленого металу дотів у зоні горіння електричної дуги і транспортуються з великою швидкістю до поверхні деталі, на яку напильється це покриття.

Суттєве значення для формування якісних напильних покриттів та ефективного використання порошкових матеріалів (гостродефіцитні та високовартісні) має вибір раціонального розміщення кінця дозуючої трубки відносно зони горіння дуги (зони плавлення дотів-електродів).

Для проведення дослідження вибираємо плоску декартову прямокутну систему координат  $XOZ$  з початком у точці перетину осі отвору дозуючої трубки порошкового живильника та осі дуттєвого сопла металізаційного апарата. Вісь  $OX$  спрямовуємо вздовж осі сопла в напрямку до поверхні, на якій формується композиційне покриття, а вісь  $OZ$  – перпендикулярно до неї, вздовж вертикальної осі дозуючої трубки, вниз.

В струмені розпилюючого повітря частинки здійснюють складний рух, який можна розглядати як результат додавання двох рухів: одного, що відбувається вздовж осі  $Z$  під дією власної ваги та сили опору  $F_1$  зі швидкістю  $V_1$ , та другого – вздовж осі  $X$  під дією сили опору  $F_2$  зі швидкістю  $V_2$ .

Розглянемо рух частинки порошку вздовж осі  $Z$ . Якщо знехтувати вагою частинки, то на

неї діятиме сила опору  $F_1$  з боку розпилюючого повітря, яка обчислюється за формулою Стокса

$$F_1 = 6 \cdot \pi \cdot \rho_1 \cdot v \cdot r \cdot V_1, \quad (1)$$

де:  $\rho_1$  – густина розпилюючого повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $v$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості розпилюючого повітря,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$r$  – радіус частинки порошку,  $\text{м}$ ;

$V_1$  – швидкість руху частинки порошку у вертикальному напрямку (вздовж осі  $Z$ ),  $\text{м/с}$ .

З іншого боку, силу опору можна визначити склавши диференціальне рівняння, яке описує рух частинки під дією цієї сили

$$F_1 = m \frac{dV_1}{dt}, \quad (2)$$

де:  $m$  – маса частинки порошку,  $\text{кг}$ ;

$t$  – час руху частинки порошку,  $\text{с}$ .

Масу сферичної частинки порошку визначаємо за формулою

$$m = \rho_2 \frac{4}{3} \pi \cdot r^3, \quad (3)$$

де  $\rho_2$  – густина матеріалу частинки порошку,  $\text{кг/м}^3$ .

Підставляючи (2) і (3) в залежність (1), отримуємо

$$\frac{dV_1}{dt} = - \frac{V_1}{\frac{r^2 \cdot \rho_2}{4,5 \cdot v \cdot \rho_1}}. \quad (4)$$

Введемо позначення:

$$a = \frac{r^2 \cdot \rho_2}{4,5 v \rho_1} = \frac{\rho_2 \cdot r^2}{4,5 \eta}, \quad (5)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості розпилюючого повітря,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Підставляючи (5) в (4), маємо:

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{a}. \quad (6)$$

Інтегруючи (6) і визначаючи постійні інтегрування з умови, що при  $t = 0$ ,  $V_1 = V_0$ , отримаємо

$$V_1 = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{a}}, \quad (7)$$

де  $V_0$  – швидкість, з якою частинки порошку надходять до струменя розпилюючого повітря із дозуючої трубки порошкового живильника пневматичної дії.

Розглянемо умови руху частинки порошку вздовж осі  $X$ . На цю частину діятиме сила опору  $F_2$ , яку визначаємо із залежності

$$F_2 = 6\pi\rho_1 v \cdot r \cdot (V_n - V_2), \quad (8)$$

де:  $V_n$  – швидкість руху розпилюючого повітря, м/с;

$V_2$  – швидкість руху частинки в горизонтальному напрямку (вздовж осі  $X$ ), м/с.

Диференціальне рівняння руху частинки вздовж осі  $X$  буде мати вигляд

$$m \frac{dV_2}{dt} = 6\pi\rho_1 v \cdot r \cdot (V_n - V_2). \quad (9)$$

Після відповідних перетворень і враховуючи вираз (5), одержимо

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_n - V_2}{\frac{r^2 \rho_2}{4,5\rho_1}} = \frac{V_n - V_2}{a}. \quad (10)$$

Інтегруючи (10), і визначивши постійну інтегрування з умови, що при  $t = 0$ ,  $V_2 = 0$ , одержимо вираз для визначення швидкості частинки порошку вздовж осі  $X$

$$(V_n - V_2) = V_n \cdot e^{-\frac{t}{a}} \quad (11)$$

або інакше

$$V_2 = V_n(1 - e^{-\frac{t}{a}}). \quad (12)$$

Позначимо величину шляху, що проходить частинка порошку в вертикальному напрямку вздовж осі  $Z$  через  $S_z$ , а в горизонтальному вздовж осі  $X$  – через  $S_x$ . Запишемо диференціальні рівняння для визначення вказаних шляхів:

$$S_z = \int V_1 dt; \quad (13)$$

$$S_x = \int V_2 dt. \quad (14)$$

Підставивши (9) і (12) відповідно у (13) і (14) та інтегруючи отримані рівняння і визначаючи постійні інтегрування з умови, що при  $t = 0$ ,  $S_z = S_x = 0$ , отримаємо:

$$S_z = V_0 a (1 - e^{-\frac{t}{a}}); \quad (15)$$

$$S_x = V_n (t - a + a \cdot e^{-\frac{t}{a}}). \quad (16)$$

Одержані залежності (15), (16) дозволяють визначити оптимальне значення координат дозуючої трубки порошкового живильника відносно зони дугового розряду, тобто встановити таке її положення, при якому частинки порошку потраплятимуть у центр дуги, що визначається точкою сходження дротів електродів. Цю задачу можна розв'язати двома методами – прямим та непрямим. За прямим методом з виразу (15), попередньо задаючись ординатою  $S_z = Z_1$ , знаходимо час  $t$ , необхідний частинці порошку, що рухається за заданою траєкторією, для досягнення осі струменя розпилюючого газу. Після цього, варіюючи значеннями початкової швидкості  $V_0$  подачі частинки порошку з дозуючої трубки живильника в розпилюючий газ, встановлюємо величину відстані  $S_x$ , яка буде визначати координату  $X_1$  осі дозуючої трубки відносно точки сходження дротів електродів (зони горіння дуги).

Отже,

$$S_z = Z_1 = V_0 (a - e^{-\frac{t}{a}}). \quad (17)$$

Звідси, після певних перетворень обчислюємо час  $t$ :

$$t = a \ln \frac{V_0 a}{V_0 a - Z_1}. \quad (18)$$

Підставляючи значення часу  $t$  з рівняння (18) в (16), одержуємо вираз для визначення координати  $X_1$

$$S_x = X_1 = a \cdot V_n \cdot \left[ \frac{V_0 \cdot a}{V_0 \cdot a - Z_1} - (1 - e^{-\frac{V_0 \cdot a}{V_0 \cdot a - Z_1}}) \right]. \quad (19)$$

Розв'язуючи задачу про оптимальне розміщення дозуючої трубки порошкового живильника непрямим методом, який полягає у встановленні названих вище координат  $Z_1$  і  $X_1$ , дослідним шляхом на основі рекомендацій [7] щодо раціонального вибору параметрів конуса розпилюючого газу і координат зони горіння дугового розряду (точки сходження дротів-електродів) визначаємо координати дозуючої трубки порошкового живильника  $Z_1$  і  $X_1$ . Далі на підставі розв'язку рівнянь (15) і (16) знайдемо значення початкової швидкості  $V_0$ , з якою частинки порошку повинні надходити із живильника в конус розпилюючого повітря, і яка забезпечує їх влучання в задану точку. Математично це описується системою рівнянь

$$S_z = Z_1 = V_0 a (1 - e^{-\frac{t}{a}}); \quad (20)$$

$$S_x = X_1 = V_n (t - a + a \cdot e^{-\frac{t}{a}}). \quad (21)$$

Визначаючи невідомі з даних рівнянь, спочатку розв'язуємо чисельним методом рівняння (21), відносно часу  $t$  із застосуванням комп'ютерної програми. Потім знайдене значення  $t$  підставляємо в рівняння (20) і в результаті цього одержуємо вираз для розрахунку швидкості подачі частинки порошку  $V_0$  із живильника через дозуючу трубку

$$V_0 = \frac{Z_1}{a \cdot (1 - e^{-\frac{t}{a}})}$$

Отже, на основі результатів проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) отримані залежності дозволяють описувати параметри руху частинок порошку в потоці розпилюючого газу (швидкість, шлях, траєкторія) при формуванні композиційних покриттів електродуговим напиленням;

2) використання розробленої методики вибору розміщення дозуючої трубки порошкового живильника відносно точки сходження дотів-електродів (зони горіння електричної дуги), дасть змогу забезпечити формування якісних композиційних покриттів та ефективно використовувати порошкові матеріали.

## Література

- 1 Хасуй А. Наплавка и напыление; пер. с японского / В.Н. Попова, А. Хасуй, О. Мори-гаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 2 Иванов В.Г. Сравнительный анализ физико-механических свойств стальных электрометаллизационных покрытий / В.Г. Иванов, И.В. Никитина, А.П. Елистратов // Сварочное производство. – 1991. – № 3. – С. 17-18.
- 3 Петров С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности: монография / С.В. Петров. – К.: ТОПАС, 2000. – 220 с.
- 4 Кустов В.В. Дослідження траєкторії руху частинок порошку в потоці транспортуючого газу / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як, В.М. Сенічак // Тези наук.-техн. конференції проф.-виклад. складу університету. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 2000. – С. 63-64.
- 5 Михалев В.И. Исследование скоростей плазменной струи и обрабатываемых в ней дисперсных частиц / В.И. Михалев, В.А. Петруничев // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 5. – С. 22-27.
- 6 Палеха Н.К. Физико-химические основы нанесения покрытий: уч. пособие / Н.К. Палеха, А.П. Эпик. – К.: НМКВО, 1992. – 224 с.
- 7 Катц Н.В. Метализация распылением / Н.В. Катц, Е.В. Антошин, Г.Д. Вадивасов, Д.Г. Вольперт, Л.М. Камионский. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.12.10

Рекомендована до друку професором  
**В.Г. Панчуком**